

تأثیر افزایش عیار سیمان بر نفوذ یون کلر و ریزساختار بتن‌های حاوی نانوسیلیس

مصطفی خانزادی^{۱*}، گرشناسب خزانلی^۲، حامد سپهری کهریزی^۳

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳- کارشناس ارشد مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت

Khanzadi@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

چکیده- در این مقاله تأثیر تغییر در عیار سیمان (از ۳۵۰ تا ۴۵۰ kg/m³) بر خواص خوردگی بتن‌های حاوی نانوذرات سیلیس بررسی شده است. بهره‌گیری از نانو تکنولوژی در سال‌های اخیر، چشم انداز گسترده‌ای را برای توسعه و بهبود خواص بتن ایجاد کرده است؛ ولی مطالعات اندک و محدود انجام شده در ارتباط با کاربرد نانوذرات در بتن، تنها به مطالعه بهبود مشخصات فیزیکی و برخی خواص دوامی بتن در اثر کاربرد این مواد محدود می‌شود؛ و به اندرکنش پیچیده این ذرات با ترکیبات بتن و محدودیت‌های عملی ساخت اشاره نشده است. نتایج آزمایش مقاومت و پتانسیل الکتریکی و نفوذ یون کلر نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس، نفوذ یون کلر را در بتن کاهش داده و مقاومت خوردگی را افزایش می‌دهد؛ ولی این تأثیر با افزایش عیار سیمان در طرح اختلاط به شدت کاهش می‌یابد. مشاهدات SEM نشان می‌دهند که ذرات نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه زیاد و فعالیت بالای پوزولانی، با افزایش عیار سیمان در طرح، ساختاری ناهمگون و با منافذ بزرگ در بتن به وجود می‌آورند که این امر موجب افزایش نفوذپذیری و ضریب نفوذ یون کلر، حتی بیش‌تر از بتن‌های معمولی، می‌شود.

کلیدواژگان: نانوسیلیس، عیار سیمان، ریزساختار بتن، خوردگی بتن، نفوذ یون کلر

۱- مقدمه

Georgiou و Koliass بیان کرده‌اند که کاهش مقاومت به علت افزایش طول ترک ناشی از افزایش حجم خمیر است [۵]. Dahir و همکاران (۲۰۰۶)، افزایش تخلخل در خمیر را علت کاهش مقاومت می‌دانند [۶]. Lam و Poon (۲۰۰۸)، علت را به نسبت مقاومت سنگدانه‌ها به مقاومت خمیر و چسبندگی بین خمیر و سنگدانه نسبت داده‌اند [۷]؛ هم‌چنین با افزایش عیار سیمان، نفوذپذیری بتن نیز به شدت افزایش می‌یابد [۳]. با افزایش حجم خمیر، توسعه

تغییر عیار سیمان در مخلوط بتنی تأثیر بالایی بر مقاومت و رفتار مکانیکی بتن، نفوذپذیری و به‌ویژه رفتار دوامی بتن در برابر محیط مهاجم دارد. به همین دلیل آیین‌نامه‌های مختلف، محدودیت‌هایی را برای بیشینه و کمینه‌ی عیار سیمان در مخلوط تعیین کرده‌اند [۲ و ۱]. در یک نسبت ثابت آب به سیمان با افزایش عیار سیمان در مخلوط، بسته به طرح اختلاط بتن، مقاومت بتن کاهش می‌یابد [۳ و ۴].

جدول (۱) مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

عنوان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
درصد	۲۱/۳۸	۴/۴۵	۳/۵۱	۶۳/۰۶	۳/۲	۱/۸

نانوسیلیس استفاده شده در این تحقیق با درصد خلوص ۹۹.۹ درصد سیلیس، قطر ذرات ۵ نانومتر و چگالی kg/cm^3 ۱/۱، از نوع محلول در آب با غلظت ۱۵٪ به صورت سوسپانسیون، محصول کشور سوئد است. نانو ذرات سیلیس با نسبت ۱/۵ درصد از وزن سیمان برای جایگزینی سیمان انتخاب شد. مخلوط بتن مرجع با نام S.O و مخلوط حاوی نانوسیلیس با نام S.N مشخص شدند و عدد پس از آخرین حرف، نشان دهنده عیار سیمان مربوطه است. نسبت آب به سیمان برای تمامی مخلوطها ثابت و برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. عنوان و ترکیب مخلوطها در جدول ۲ آمده است.

۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

برای تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن‌های ساخته شده، به ترتیب طبق استانداردهای BS 1881-108,110 و ASTM C192 از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی متری برای مقاومت فشاری و استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی متری برای مقاومت کششی استفاده شد. آزمایش جذب آب بتن‌ها با الگوبرداری از دستور BS 1881-Part 122 و بیش‌تر شبیه به BS 1881 قدیمی به شکل درصد وزنی انجام شد. با استفاده از میانگین‌گیری، نتایج ۳ آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی متری به دست آمد. آزمایش جذب آب مویینه بر اساس دستورالعمل RILEM CPC 11.2 و TC 14-CPC و بر اساس میانگین سه نمونه مکعبی با حجم ۱۰۰ میلی متر مکعب انجام شد. در آزمایش مقاومت الکتریکی همانند آزمایش تعیین مقاومت فشاری از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی متری با همان شرایط عمل‌آوری استفاده شد.

ترک‌های جمع شدگی در خمیر سیمان و در نتیجه آن نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد [۳]. مقصودی (۲۰۰۶) نشان داده است که با کاهش حجم سنگدانه در مخلوط، مسیرهای انتقال افزایش یافته ولی طول مسیر کوچک می‌شود؛ پس حجم نفوذ کاهش می‌یابد در حالی که عمق نفوذ تغییری نمی‌کند [۸]. با کاهش نسبت سنگدانه‌ها در مخلوط، پیچ و خم و موانع در برابر حرکت مایعات کاهش یافته و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۹ و ۱۰].

تأثیر منفی افزایش عیار سیمان بر پارامترهای دوامی بتن را در کاهش مقاومت الکتریکی و در نتیجه مقاومت بتن در برابر خوردگی نیز می‌توان مشاهده کرد [۱۱]. با افزایش حجم خمیر و در نتیجه آن تخلخل مخلوط بتنی، آب منفذی بتن افزایش می‌یابد که موجب کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود [۱۳]. Shi این پدیده را به کاهش سنگدانه‌ها مربوط می‌داند چرا که سنگدانه‌ها مقاومت بیش‌تری در برابر حرکت یون‌ها دارند [۱۲].

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

برای سنگدانه‌ها در طرح مخلوط این پژوهش از ماسه گرد گوشه رودخانه‌ای با چگالی kg/m^3 ۲۶۳۰ و شن با بیشینه‌ی اندازه ذرات ۱۲/۵ mm که طبق استاندارد ASTM C136-96 دانه‌بندی شده است استفاده شد. فوق‌روان‌کننده مصرفی از نوع GLENIUM 51P پایه کربوکسیلاتی است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ و محصول کارخانه سیمان تهران و میکروسیلیس مصرفی محصول کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران (ازنا) بوده که چگالی ذرات آن kg/m^3 ۲۲۰۰ است و خواص شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

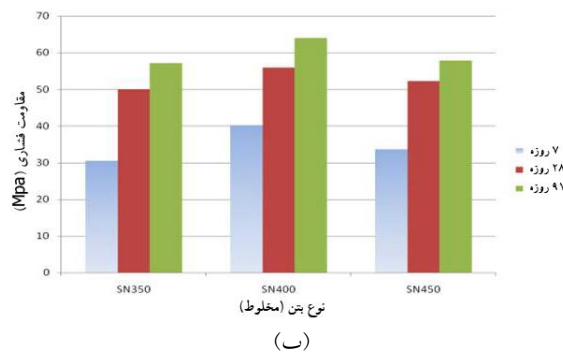
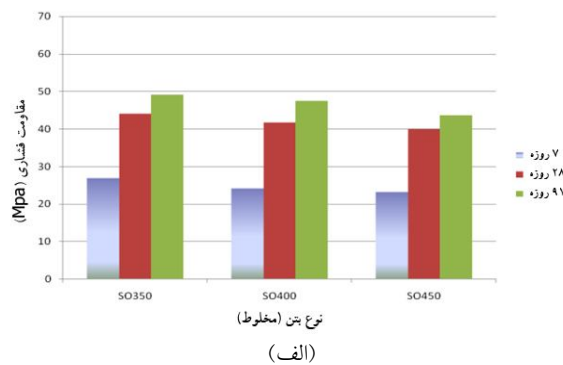
جدول (۲) مشخصات طرح مخلوط نمونه‌ها

نام مخلوط	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	نانوسیلیس (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	اسلامپ (mm)
S.O.35	۳۵۰	۱۸۷	۱۰۶۸	۷۳۵	-	-	۸۰
S.O.40	۴۰۰	۱۹۹	۹۹۶	۴۸۵	-	-	۸۰
S.O.45	۴۵۰	۲۱۹	۹۴۱	۶۴۵	-	-	۸۰
S.N.35	۳۴۵	۱۴۸	۱۰۵۳	۷۲۴	۵/۲۵	۳/۹۲	۸۰
S.N.40	۳۹۴	۱۶۵	۹۹۴	۶۸۳	۶/۰	۴/۸۰	۸۰
S.N.45	۴۴۳	۱۸۲	۹۴۰	۶۴۶	۶/۷۵	۵/۴۰	۸۰

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

۳-۱- خواص مکانیکی

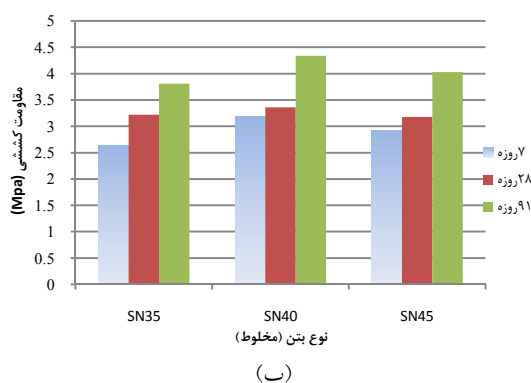
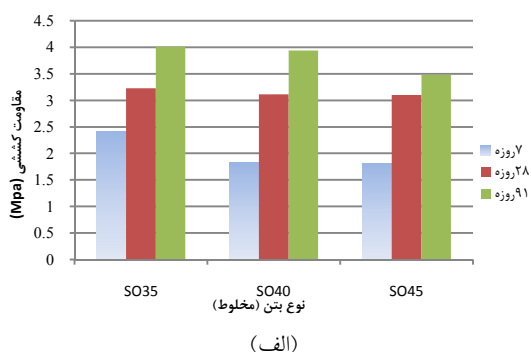
نمونه‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمایانگر مقاومت‌های فشاری و کششی بتن‌های مرجع و نانوسیلیسی هستند. ملاحظه می‌شود که با افزودن مقدار کمی (۱.۵٪ وزن سیمان) نانوذرات به مخلوط در تمامی عیارهای سیمان افزایش قابل توجهی در مقاومت‌ها ایجاد شده است.



نمودار (۱) (الف) مقاومت فشاری بتن مرجع، (ب) مقاومت فشاری بتن نانوسیلیسی

برای انجام آزمایش نیم‌پیل ضمن استفاده از برخی نکات موجود در ASTM C876 و آزمون‌های استوانه‌ای به قطر ۶۰ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm که در محور مرکزی آن‌ها، میلگرد آجدار از فولاد ST 37، به قطر اسمی ۱۲ mm و طول ۱۴۰ mm قرار داده شده بود، استفاده شد. الکتروود مرجع استفاده شده در این پژوهش، الکتروود کالومل اشباع (SCE) بود که اختلاف پتانسیل آن‌ها با میلگردهای مدفون در آزمون‌ها از طریق ولت‌متری با دقت ۰/۱ میلی‌ولت اندازه‌گیری شد.

برای تعیین ضرب انتشار یون کلرید تا عمق ۲۰ میلی‌متر از هر ۵ میلی‌متر، پودر بتن تهیه شد و از عمق ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر نیز اقدام به یک نمونه پودرگیری از بتن شد. بنابراین پودرهای حاصل مربوط به عمق‌های (۰-۵)، (۵-۱۰)، (۱۰-۱۵)، (۱۵-۲۰) و (۲۰-۳۰) میلی‌متر بودند. پودرهای تهیه شده از هر عمق در پنج وجه سه آزموه هر نمونه، با یکدیگر مخلوط شده و از آن در آزمایش تعیین غلظت یون کلرید محلول در آب استفاده شد. برای تعیین غلظت یون کلرید، در هر عمق از روش ASTM C1218 که بیانگر غلظت یون کلرید محلول در آب است استفاده شد.



نمودار (۲) (الف) مقاومت کششی بتن مرجع، (ب) مقاومت کششی بتن نانوسیلیسی

مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های دارای عیار سیمان 350 kg/cm^3 بتن مرجع و بتن نانوسیلیسی، نشان دهنده افزایش مقاومت نمونه‌های نانویی است؛ ولی نسبت به نمونه‌های دارای عیار سیمان 400 kg/cm^3 ، افزایش کمتری داشته است.

۳-۲- نفوذپذیری و جذب آب

نمودار ۳ جذب آب بتن‌های مرجع و نانوسیلیسی را نشان می‌دهد. افزایش عیار در نمونه‌های بتن مرجع سبب افزایش جذب آب شده است. افزایش عیار سیمان که با افزایش حجم خمیر سیمان در مخلوط همراه است سبب می‌شود که ترک‌های سطحی ایجاد شده به‌خاطر جمع‌شدگی پلاستیک، افزایش یابد. این ترک‌ها منافذ لازم را برای عبور جریان مایع به درون بتن و جذب آب را افزایش می‌دهد.

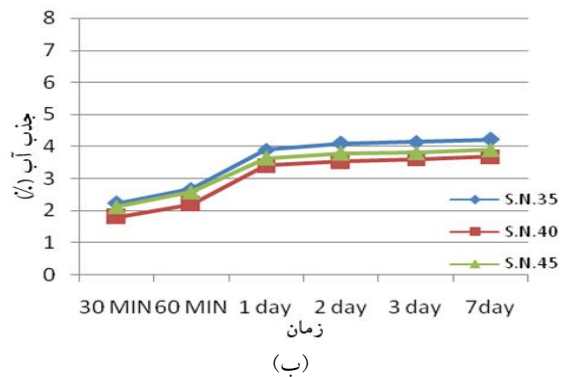
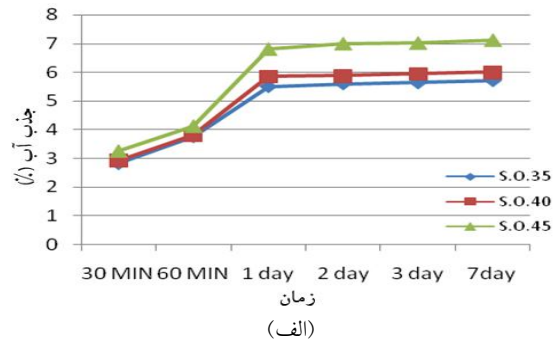
با مقایسه نتایج آزمون‌های فشاری OPC در نمودارهای ۱- الف و ۲- الف مشاهده می‌شود که با افزایش عیار سیمان از 350 به 450 kg/cm^3 مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این پدیده به خاطر کاهش مقدار [سنگدانه که با افزایش حجم خمیر همراه بوده و سبب می‌شود که ترک‌های داخل خمیر گسترش بیش‌تری پیدا کرده و شبکه ریزترک‌های متقاطع، ایجاد شود] کاهش مقاومت فشاری را نتیجه می‌دهد.

بررسی نتایج مقاومت کششی ثابت می‌کند که توسعه ریز ترک‌ها در خمیر با افزایش عیار، سبب افت مقاومتی می‌شود، مقاومت کششی به‌خاطر وابستگی به توسعه یک ترک نسبت به مقاومت فشاری که در اثر شبکه‌ای از ترک‌های مرتبط ایجاد می‌شود تأثیر بیش‌تری از عیار سیمان می‌پذیرد [۱۴]. ولی مرور نمودارهای ۱ (ب) و ۲ (ب) نشان می‌دهد که این روند با افزودن نانوذرات سیلیس به بتن تغییر می‌کند. در بتن‌های نانوسیلیسی کمترین مقدار مقاومت فشاری و کششی ۹۱ روزه در بتن با عیار سیمان 350 kg/cm^3 به ترتیب 0.7 و 3.73 Mpa است، درحالی‌که در مورد بتن نانوسیلیسی با عیار سیمان 400 kg/cm^3 این مقادیر به ترتیب 0.64 و 4.42 است. علت را می‌توان به ترکیب به‌دست آمده از مخلوط نسبت داد، چرا که با اضافه شدن نانوسیلیس به مخلوط به علت ریزدانه بودن و فعالیت بالای پوزولانی آن و این‌که در مخلوط با عیار سیمان 400 نسبت به مخلوط با عیار سیمان 350 ، کریستال‌های Ca(OH)_2 بیش‌تری در واکنش حضور دارد، مخلوط یکنواخت‌تری بوجود می‌آید؛ در نتیجه شبکه ریزترک‌ها محدود می‌شود؛ پس توسعه مقاومت حتی با افزایش عیار به 400 kg/cm^3 نیز ممکن است.

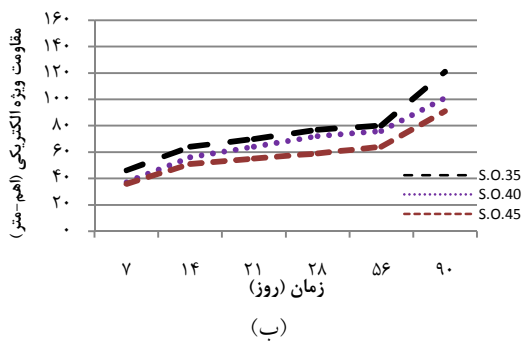
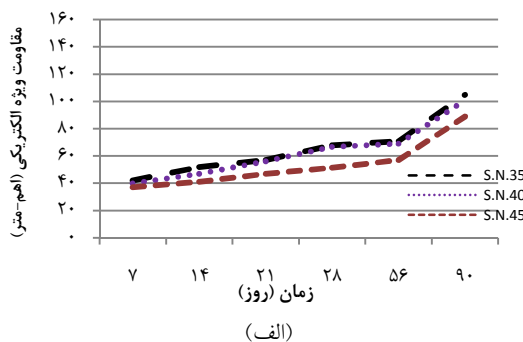
۳-۳- رفتار دوامی

نمودارهای ۴ و ۵-الف در ادامه نشان‌دهنده چگونگی تأثیر تغییرات عیار سیمان بر مقاومت الکتریکی و پتانسیل الکتریکی بتن‌های معمولی است. با افزایش عیار سیمان و حجم خمیر در مخلوط بتنی، مقاومت ویژه الکتریکی بتن کاهش می‌یابد؛ و مشابه این رفتار در نمودارهای ۵-الف در ارتباط با پتانسیل الکتریکی بتن مشاهده می‌شود. افزایش حجم خمیر در یک سن ثابت و در نتیجه درجه هیدراسیون ثابت، به معنای افزایش حجم منافذ بتن است. حجم منافذ مهم‌ترین فاکتوری است که آب منفذی و در نتیجه هدایت الکتریکی بتن را کنترل می‌کند. رفتار بتن در این شرایط مانند یک پیل الکتریکی است که آب منفذی نقش الکترولیت آن را ایفا می‌کند؛ به همین علت به راحتی می‌توان افزایش مقاومت الکتریکی و پتانسیل الکتریکی را با افزایش عیار توجیه کرد.

به همین علت مشاهده می‌شود جذب آب در بتن با عیار سیمان 350 تا 450 kg/cm^3 به ترتیب از $5/7$ تا $7/1$ افزایش پیدا کرده است.



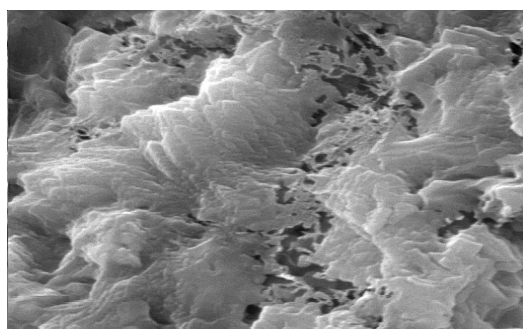
نمودار (۳) (الف) جذب آب بتن مرجع، (ب) جذب آب بتن نانوسیلیسی



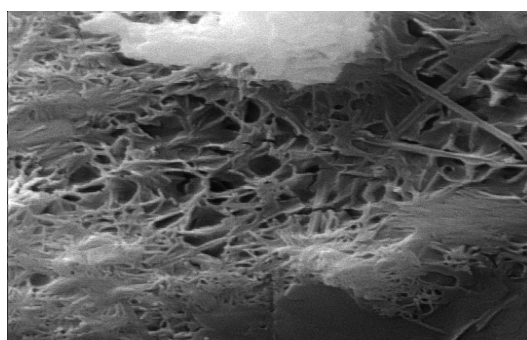
نمودار (۴) (الف) مقاومت الکتریکی بتن مرجع، (ب) مقاومت الکتریکی بتن نانوسیلیسی

در بتن‌های حاوی نانوسیلیس کمترین مقدار جذب آب را در مخلوط با عیار سیمان 400 kg/cm^3 داشته است؛ چرا که اثر پرکنندگی ریزدانه‌ها و متراکم‌تر شدن ساختار خمیر سیمان، باعث محدود شدن خلل و فرج شده؛ پس فضای خالی کمتری برای جمع‌شدگی وجود دارد و در نتیجه جذب آب در بتن کاهش می‌یابد. اثر متناقض نانو را نیز در همین موضوع می‌توان جست‌وجو کرد. با افزایش عیار سیمان تا 400 kg/cm^3 ، منافذ به شکلی توزیع می‌شوند که نانوذرات می‌توانند به عنوان مانع جلوی گسترش آن‌ها را بگیرد؛ پس کاهش جذب آب داریم.

هیدراسیون افزایش و کریستالها کاهش می‌یابد ولی در مقابل سرعت کسب مقاومت بالاتر آن موجب ایجاد ساختاری ناهمگن و با منافذ بزرگ می‌شود. عکس میکروسکوپ الکترونی ۱- الف ساختار خمیر سیمان مربوط به نمونه‌های نانوسیلیسی (NS) را در سن ۹۱ روز نشان می‌دهد. در این عکس به‌خوبی ساختار ناهمگن موجود در بتن قابل مشاهده است. توسعه سریع مقاومت در این نمونه‌ها سبب بوجود آمدن ساختاری ناهمگن در ماتریس سیمانی شده که در نتیجه آن اندازه منافذ داخلی بزرگ‌تر و ارتباط بین منافذ بیشتر می‌شود. این افزایش در اندازه و ارتباط منافذ در ریزساختار است که منجر به کاهش مقاومت الکتریکی و پتانسیل خوردگی نمونه‌های نانوسیلیس (NS) [نمودار ۴ و ۵] شده است.



(الف)

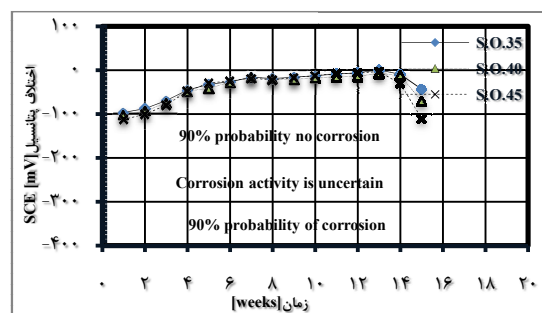


(ب)

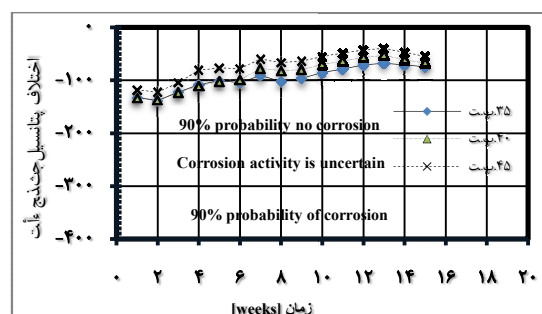
عکس (۱) الف) ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان در بتن مرجع،

ب) ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان بتن نانوسیلیسی

اما رفتار بتن‌های حاوی نانوسیلیس مغایر با آنچه در رفتارهای مکانیکی این نوع بتن‌ها دیده شد؛ است. در نمودارهای ۴ و ۵- ب مشاهده می‌شود که اضافه شدن نانوسیلیس سبب کاهش مقاومت الکتریکی و اختلاف پتانسیل می‌شود. افزایش ضریب انتشار یون کلر [جدول ۴]، نیز مؤید همین موضوع است.



(الف)



(ب)

نمودار (۵) الف) اختلاف پتانسیل مخلوط مرجع، ب) اختلاف

پتانسیل مخلوط نانوسیلیسی

کاهش پارامترهای دوامی بتن در برابر خوردگی با افزایش عیار را در بتن‌های معمولی می‌بایست به افزایش حجم خمیر سیمان، و توسعه منافذ و افزایش قطر منافذ نسبت داد. در بتن‌های معمولی به‌خاطر افزایش حجم خمیر که با کاهش میزان سنگدانه‌ها همراه است قیدها در برابر توسعه ترک‌ها کاهش می‌یابد. ساختار ناهمگن بتن نانوسیلیسی موجب تشدید تأثیر این مکانیسم در این نوع بتن‌ها می‌شود. در حالی‌که با اضافه شدن نانو سیلیس، محصولات

جدول (۴) ضرایب انتشار، C_s محاسباتی و ضرایب همبستگی خطوط برازش شده از داده‌های پروفیل کلرید (محاسبات با استفاده از پروفیل کلرید به دست آمده نسبت به وزن بتن)

S.N.45	S.N.40	S.N.35	S.O.45	S.O.40	S.O.35	نام مخلوط
۲۲۷/۷	۲۰۳/۸۷	۱۵۹/۸۷	۱۸۷/۲	۱۶۲/۱۶	۱۵۷/۹	$(mm^2/year) D$
۴/۱۵	۵/۵۲	۴/۹۹	۷/۷	۷/۰۸	۴/۱۹	C_s (محاسباتی)
۰/۹۸۹	۰/۹۹۶	۰/۹۷۶	۰/۹۷۹	۰/۹۹۱	۰/۹۴۲	R^2

D: ضریب انتشار یون کلرید بتن، R^2 : ضریب همبستگی خط برازش شده

۴- نتیجه گیری

افزایش عیار سیمان از ۳۵۰ تا $450 kg/cm^3$ در مخلوط بتنی معمولی سبب کاهش مقاومت و تأثیر منفی بر پارامترهای دوامی و نفوذپذیری بتن دارد. توسعه ترک‌ها به‌خاطر افزایش حجم خمیر و کاهش قیود سنگدانه به دلیل کاهش نسبت سنگدانه به سیمان، باعث افزایش منافذ و کاهش ضریب نفوذ یون کلر در بتن می‌شود.

اضافه شدن ذرات نانوسیلیس در بتن، به دلیل ویژگی ریزدانه‌گی و فعالیت پوزولانی آن موجب افزایش مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری می‌شود. ولی روند تأثیر افزایش عیار سیمان در این بتن‌ها با آنچه در بتن‌های معمولی مشاهده می‌شود متفاوت است. با افزایش عیار بتن‌های حاوی نانوسیلیس از ۳۵۰ به $400 kg/cm^3$ ، برخلاف بتن‌های معمولی، افزایش مقاومت فشاری و کششی مشاهده می‌شود. عکس‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که این ذرات با سطح ویژه زیاد و فعالیت بالای پوزولانی، سرعت فرایند هیدراسیون را افزایش داده، و موجب می‌شوند محصولات دور ذرات سیمان به سرعت تشکیل شوند. در نتیجه در عین کاهش کریستال‌ها، به‌ویژه در منطقه انتقالی، ساختاری ناهمگون و با منافذ بزرگ بوجود می‌آید که باعث افزایش نفوذپذیری و ضریب نفوذ یون کلر، حتی بیش‌تر از بتن‌های معمولی، می‌شود. پس توصیه می‌شود در ساخت بتن‌های حاوی نانوسیلیس به عیار سیمان و نوع کاربرد بتن

دقت شود؛ چرا که این نوع بتن‌ها نسبت به تغییرات مقدار سیمان حساس بوده و در مقابل خوردگی عملکرد خوبی ندارند.

۵- مراجع

[۱] "آیین‌نامه بتن ایران"، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، سازمان برنامه و بودجه، شماره نشریه: ۱۲۰، ص. ۴۳۳، تجدید نظر اول.

- [2] ACI 350.2R – 04. (2004) "Concrete Structures for Containment of Hazardous Materials", ACI Manual of Concrete Practice, Part IV.
- [3] Yegiter H, Yezici H. (2007) "Effect of Cement Type, Water/Cement Ratio and Cement Content on Sea Water Resistance of Concrete", Building and Environment, Vol. 42, pp. 1770–1776.
- [4] Deshpande S., Darwin D. and Browning J. (2007) "Evaluation Free Shrinkage of Concrete for Control of Cracking in Bridge Decks", Structural Engineering and Engineering Materials, SM Report No. 89, The University of Kansas Center for Research, INC., Lawrence, Kansas.
- [5] Kolia S, Georgiou C. (2005) "The Effect of Paste Volume and of Water Content on the Strength and Water Absorption of Concrete", Cement & Concrete Composites, No. 27, pp. 211 – 216
- [6] Dahir R.K., MCarthy M.J., Tittle P.A.J. (2006) "Role of Cement Content in Specification for Concrete Durability: Aggregate Type Influences". Structures & Building, Vol.159, pp. 229–242.

- [12] Shi, C. (2004) "Effect of Mixing Proportions of Concrete on Its Electrical Conductivity and Rapid Chloride Permeability Test (ASTM C 1202 or ASSHTO T277) Results", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 537–545.
- [13] Hartt W. H., Powers R. G., Leroux V., and Lysogorski D. K., (2004) "A Critical Literature Review of High Performance Corrosion reinforcement in Concrete Bridge Application", Report No. FHWA-HRT-04-093, Federal Highway Administration, pp. 54
- [۱۴] کومار مهتا پ، مونته ئیرو د.ج.م، (۱۳۸۵) "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، ترجمه رمضانیانپور ع.ا، قدوسی پ، و گنجیان ا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص. ۷۸۱.
- [7] Poon Chi.Sun, Lam Chi.Sing, (2008) "The Effect of Aggregate-to-Cement Ratio and Types of Aggregate on The Properties of Pre-Cast Concrete Blocks", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 283–289
- [8] Maghsoudi V. (2006) "The Effect of Aggregate Fraction on Molecular Ion Transport through Concrete", Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, Imperial College of Science Technology and Medicine, London, pp. 241.
- [9] Shah S.P., Leung C. K. Y, Li Z., Ding J. T. (Eds), (2000) "High-Performance Concrete-Workability, Strength and Durability", The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- [10] Delagrave A., Bigas J.P, Olivier J.P, Marchand J, and Pigeon M, (1997), *Adv. Cem. Bas. Mater.* No. 5, pp. 86.
- [11] Hughes B.P, Soleit A.K.O, and Brierley A.W, (1985) "New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete", *Mag. Cocr. Res.*, No. 13, pp.3243 – 248.

Influence of Cement Content Increase on Chloride Diffusion and Microstructure of Concretes Containing Nano-SiO₂

M. Khanzadi^{1*}, G. Khazaeni², H. Sepehri Kahrizi³

1- Assistant Professor, Civil Department, Iran University of Science and Technology

2- Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

3- MA in Construction Engineering and Management, Iran University of Science and Technology

Khanzadi@iust.ac.ir

Abstract:

The influence of cement content increase on corrosion resistant behavior in concretes containing nano-SiO₂ was experimentally studied. For comparison, the chloride diffusion of plain concrete and the concrete containing nano-SiO₂ was also experimentally studied. The test results indicated that the corrosion resistance of concretes containing nano-particles is significantly improved. However, the index of diffusion chloride ion in the concretes containing nano-SiO₂ is directly related to cement content in the mix. The SEM observations revealed that the microstructure of concrete with nano-SiO₂ is more uniform and compact than that of normal concrete, but higher pore size distribution was observed when cement content is increased, which in turn leads to the increase in the diffusion of chloride ion.

Keywords: Nano concrete, Nano-SiO₂, Corrosion, Chloride diffusion, Microstructure